第36卷，第3期
2016年3月

光谱学与光谱分析
Spectroscopy and Spectral Analysis

Vol. 36, No. 3, pp857-863
March, 2016

在线诊断光谱仪用光栅制作误差对光谱成像的影响及补偿

姜岩秀[1,2]，巴音贺希格[1*]，杨　硕[1,2]，赵旭龙[1,2]，吴　娜[1]，李文昊[1]

1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所，吉林 长春　130033
2. 中国科学院大学，北京　100049

摘　要　为制作应用于在线诊断光谱仪的高分辨率光栅，通过分析记录参数误差对光栅刻线密度、聚焦曲线、谱像宽度等的影响及规律，提出相应的补偿方法是必要前提。基于费马原理、光程差理论及像差理论，分析了光栅光谱性能对记录参数误差的影响及其敏感性。在光栅使用参数固定的情况下，记录角度误差对光谱性能影响较大，在光栅设计时可通过对记录角度加权的方法来提高记录角度的取值的精确度；记录臂长误差对光谱性能影响较小；记录臂长和记录角度的相对误差决定了其对光栅光谱性能影响程度。结果表明，单侧记录臂长和角度误差对光谱性能的影响，可分别通过调节两臂臂长及角度的相对误差进行补偿。由此可以确定对应用于在线监测光谱仪光栅成像质量影响较大的误差因素，并给出制作误差的相应补偿方法，降低曝光系统的调试难度，为制作在线诊断光谱仪用高分辨率光栅提供理论指导。

关键词　平面变栅距全息光栅；分辨率；刻线密度误差；聚焦曲线；谱像宽度

中图分类号：O443.4　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.3964/j.issn.1000-0593(2016)03-0857-07

引　言

同步辐射光源由于其连续光谱、高准直性、高亮度、具有偏振以及脉冲时间结构，同时其光谱性能可预知和精确调节等特点，广泛应用于基础科学、物质科学和生命科学等科学研究领域[1-5]。大连化物所相干光源(DCLS)作为第四代同步辐射光源的光学设计相比前三代同步辐射光源面临着新的挑战[6]，其中光源的光谱在线诊断即为其中难题之一。采用超环面镜和光栅构成光谱仪，用于对光源进行在线诊断，要求光谱仪分辨本领达至12 000[7]。由于使用光谱为50～150 nm的极紫外波段，考虑到保持较高的能量传输特性和后续光束线传播，选择平面变栅距光栅作为此光谱仪的核心元件较为合理[7,8]。

目前在科研、生产中较多使用球面波曝光系统制作全息光栅。使用球面波曝光可以令基底表面不同的点以不同的干涉角度曝光，形成变栅距光栅，通过合理的选择记录参数可以消除特定阶次像差[9-12]，这种曝光光路光学元件较少，且仅有4个记录参数，光路调节相对较为简单，可以制作出高质量的光栅，在实际制作中较多采用球面波曝光系统。

变栅距全息光栅掩模的制作主要是根据设计得到的记录参数对曝光光路系统进行调试，通过选择不同的位移记录参数及角度记录参数即可以制作出不同刻线密度函数的变间距全息光栅。在曝光系统调试过程中，两个点光源的空间位置误差无法严格按照设计值放置，各个记录参数必然在其位置附近产生漂移，这一漂移量即为记录参数误差，而制作误差必然会影响平面变栅距全息光栅的刻线密度函数分布，变栅距光栅的自聚焦以及像差校正能力是由于栅距按一定规律变化获得的，即光栅刻线密度变化直接影响其聚焦曲线以及谱像宽度，而谱像宽度越宽分辨能力越低。由于这些误差的存在会导致制作的平面变栅距光栅无法满足光谱仪器的高分辨率要求。鉴于此，必须对设计的变栅距光栅制作误差对刻线密度、聚焦曲线及谱线宽度的影响进行数值分析，分别计算记录臂长和记录角度存在误差时的光栅光谱分辨能力，并分析其变化规律，从而找到记录参数误差的补偿方法，旨在为应用于在线诊断光谱仪的高分辨率平面变栅距全息光栅的设计与制作提供理论指导。

1　变栅距光栅的优化设计

图1为变间距全息光栅的球面波记录光路图。如图所示，曝光系统由两个点光源C，D和一个平面基底组成，C，

收稿日期：2014-09-18，修订日期：2015-01-28
基金项目：国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ120023)资助
作者简介：姜岩秀，1987年生，中国科学院大学博士研究生　　e-mail：jiangyanxiup@163.com
*通讯联系人　　e-mail：bayin888@sina.com

D 中心和光栅基底中心点 O 共面。以光栅中心点 O 为原点建立直角坐标系，光栅法线方向为 x 轴，垂直刻线方向为 y 轴，与刻线平行方向为 z 轴。点光源 C 和 D 发出的球面波在基底表面干涉曝光形成光栅。点 C 与点 O 的连线 CO 的长度为 r_C，CO 与 x 轴夹角为 r；点 D 与点 O 的连线 DO 的长度为 r_D，DO 与 x 轴的夹角为 δ；入射光径 A 点的光线通过光栅衍射与像平面交于点 B。点 A 与点 O 的连线 AO 的长度为 r_A，AO 与 x 轴夹角为 α；点 B 与点 O 的连线 BO 的长度为 r_B，与 x 轴的夹角为 β。

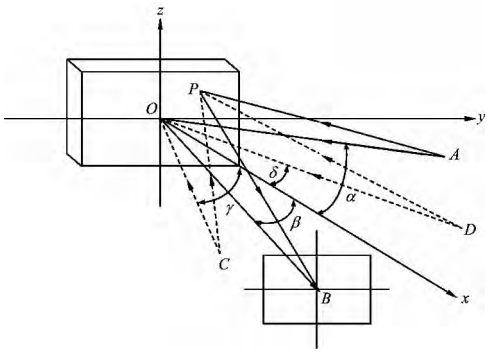


Fig. 1 Spherical wavefront recording system

根据 Namioka 的几何理论，理想球面波曝光系统下，子午面内光栅的刻线密度表达式[13]

$$n_d = n_0 + n_1 y + n_2 y^2 + n_3 y^3 + \cdots \tag{1}$$

其中：n_0，n_1，n_2 和 n_3 是关于球面波记录参数(γ，r_C，δ，r_D)的函数，n_0 为光栅中心处的线密度，n_1 对应水平聚焦条件，n_2 和 n_3 分别对应慧差和球差。

应用于在线诊断光谱仪中光栅的使用要求[7]为：光栅使用波段为 50～150 nm，中心刻线密度 600 gr·mm^{-1}，光栅面积为 10×30 mm^2，光谱级次 $m=+1$，入射角 $\alpha=87.6°$，入臂 $r_A=-19\ 000$ mm，使用波长 100 nm 时，出臂 $r_B=1\ 500$ mm，记录波长为 441.6 nm，要求校正球差和慧差。

由式(1)、光栅使用参数以及 Itou 的像差表达式[14]，得到平面变栅距光栅刻线密度表达式

$$n_e = 600 - 0.786\ 9y + 7.398\ 2\times10^{-4}y^2 - 5.969\times10^{-7}y^3 \tag{2}$$

应用改进的局部优化算法，使用光栅表面刻线密度误差的平方和的形式来建立优化目标函数[15]，根据式(1)和式(2)，得到目标函数表达式为

$$obj = r_1^2 + \frac{1}{3}y_0^2(2r_1r_3 + r_2^2) + \frac{1}{5}y_0^4(r_3^2 + 2r_2r_4) + \frac{1}{7}y_0^6r_4^2 \tag{3}$$

$$\begin{cases} r_1 = n_0 - 600 \\ r_2 = n_1 - (-0.786\ 9) \\ r_3 = n_2 - 7.398\ 2\times10^{-4} \\ r_4 = n_3 - (-5.969\times10^{-7}) \end{cases} \tag{4}$$

其中，y_0 为光栅半宽度，r_1，r_2，r_3 和 r_4 为设计刻线密度系数与期望刻线密度系数误差。

经过优化计算，得到记录参数优化结果如表 1 所示。刻线密度函数及其误差分布曲线以及如图 2 所示，由图可知，变栅距全息光栅的刻线密度优化设计值与期望值的绝对误差最大值为 0.07 gr·mm^{-1}，相对误差最大值为 1×10^{-4}，变栅距全息光栅的刻线函数优化设计值与期望值基本符合。根据像差对变栅距光栅光谱分辨率的因素影响[16-17]计算了不同使用波长下设计的变栅距全息光栅的理论分辨能力，图 3 为理论分辨能力分布曲线。由图可知，设计的变栅距光栅在使用波段 50～150 nm 的分辨能力在 12 000 以上，满足仪器使用要求。

Table 1 Recording parameters of the plane VLS grating

记录参数	r_C/mm	γ/rad	r_D/mm	δ/rad
数值	914.35	−1.157 2	1 099.99	−0.708 5

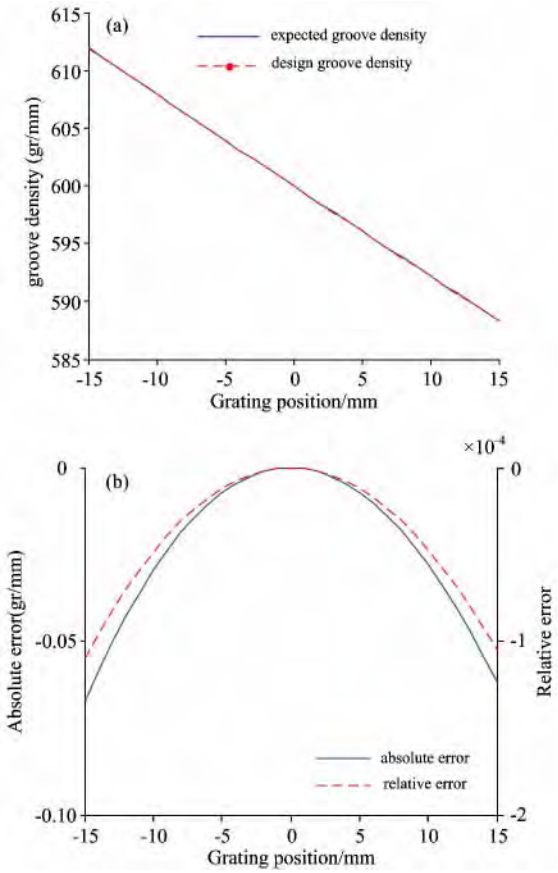


Fig. 2 Groove density curve of the plane VLS grating

(a): Designed and expected groove density curve of the plane VLS grating; (b): Absolute and relative error curve of the plane VLS grating between designed and expected groove density

2 变栅距全息光栅记录参数误差分析

根据改进的局部优化算法的计算结果，在记录参数为理想值的条件下 50～150 nm 全波段的分辨能力在 12 000 以上，满足仪器使用要求。然而实际制作过程中，各个记录参数必然存在误差，在使用条件固定的情况下记录参数误差会引起平面变栅距光栅的刻线密度、聚焦曲线及谱像宽度的变化，导致光栅光谱分辨能力的降低，无法满足仪器使用要

求，因此需要分析记录参数误差对光栅分辨能力的影响。考虑到平面变栅距光栅刻线密度与像差关系及光谱仪器的结构，分别考察各个记录参数误差对光栅刻线密度、聚焦曲线、谱像宽度及分辨能力的影响。为使讨论结果更符合实验条件，根据光路实际情况设定记录参数的误差，设记录臂长误差为±1 mm，记录角度误差为±0.01 rad。

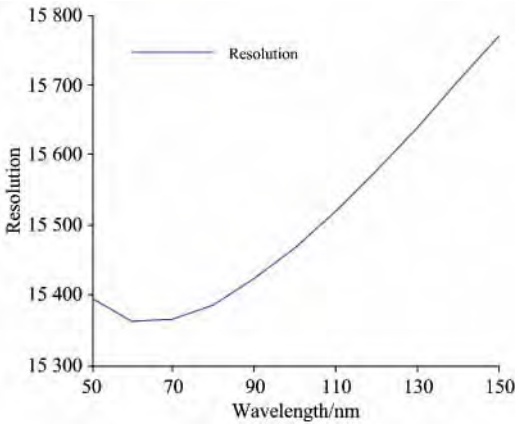


Fig. 3　Resolution curve of the plane VLS grating

2.1　记录臂长误差对光栅刻线密度的影响

在记录角度不变的情况下，只改变记录臂长，根据式(1)的刻线密度表达式计算在不同记录臂长误差下光栅表面各点刻线密度实际值与设计值的绝对误差曲线，如图 4 所示。图 4 中 4 条曲线，分别为记录臂长 r_C 和 r_D 误差分别为±1 mm 时，刻线密度绝对误差分布曲线(图中表示为 r_C±1 等，下同)。由图可知，记录臂长误差：(1)对光栅中心刻线密度无影响，刻线密度绝对误差曲线以光栅中心为轴左右呈对称分布；(2)对刻线密度函数分布影响较小，臂长误差引起的刻线误差小于 0.02 gr·mm^{-1}；(3)分别为±1 mm 时，刻线误差曲线基本上呈对称分布。

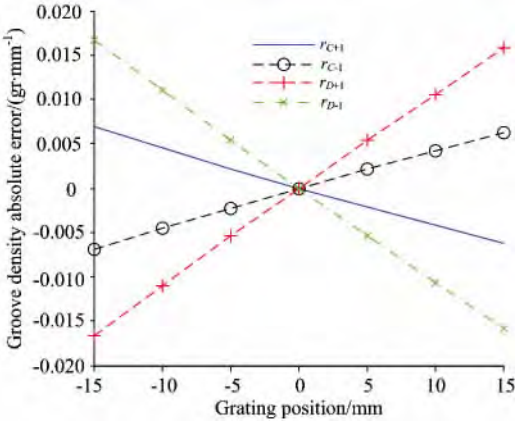


Fig. 4　Effects of recording distance error on groove density absolute error curve

2.2　记录臂长误差对聚焦曲线的影响

由在线监测光谱仪的设计可知，其不同使用波长下光栅聚焦曲线是按照一定规律变化的曲线，其聚焦点误差容差为 1 mm[6]，在记录角度不变的情况下，只改变记录臂长，根据聚焦方程 $F_{20}=0$，计算在不同记录臂长误差下聚焦曲线及其绝对误差曲线，如图 5 所示。图 5(a)中的 5 条曲线，分别为使用波段下仪器要求聚焦曲线及记录臂长 r_C 和 r_D 误差分别为±1 mm 时的聚焦曲线，图 5(b)中的 4 条曲线，分别为使用波段下记录臂长 r_C 和 r_D 误差分别为±1 mm 时与理想聚焦点绝对误差曲线。由图 5(a)可知，5 条聚焦曲线基本重合，说明记录臂长误差引起的聚焦点变化较小。由图 5(b)可知，记录臂长误差：(1)引起的聚焦点绝对误差值约为 1～2 mm，大于光谱仪器聚焦点 1 mm 误差容限；(2)分别为±1 mm 时，聚焦曲线对称分布且近似为一直线。

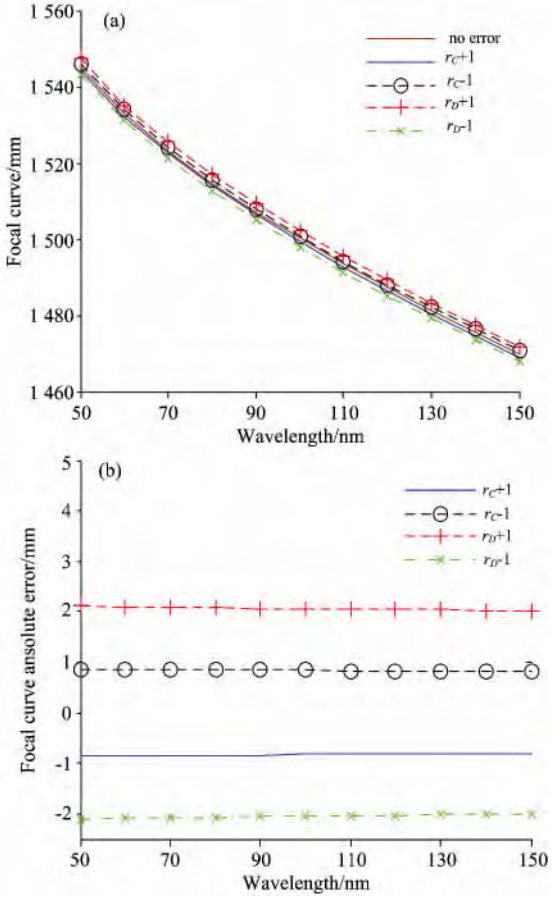


Fig. 5　Effects of recording distance errors on focal curve

(a)：Focal curve of recording distance errors；(b)：Focal absolute error curve of recording distance errors

2.3　记录臂长误差对谱像宽度及分辨能力的影响

在其他参数不变的情况下，只改变记录臂长，计算不同波长下的谱像宽度以及分辨能力。分别通过光线追迹计算谱像的中心宽度及像差对变栅距光栅光谱分辨能力的影响计算其理论分辨能力，如图 6 所示。图 6(a)中的 5 条曲线，分别为理想记录参数及记录臂长 r_C 和 r_D 误差分别为±1 mm 时的谱像宽度，图 6(b)中的 5 条曲线表示，理想记录参数下的分辨能力及记录臂长 r_C 和 r_D 误差分别为±1 mm 时的分辨能力。从图可知，记录臂长误差：(1)引起的谱像宽度变化约为 0.01～0.015 mm；(2)引起的分辨能力变化约为 19 000～

12 700，不能满足仪器全波段分辨能力 12 000 的使用要求；(3)分别为±1 mm 时，谱像宽度和分辨能力曲线基本重合。

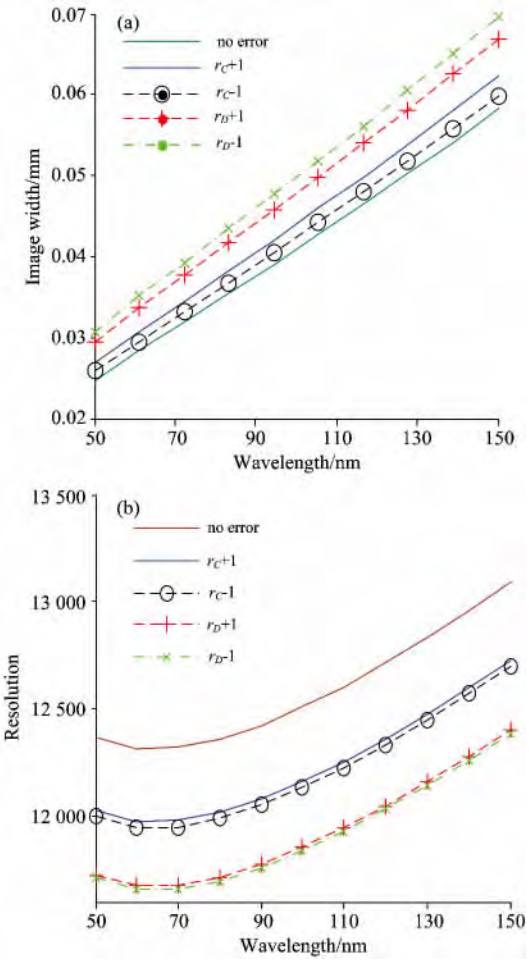


Fig. 6 Effects of recording distance errors on image

(a): Image width; (b): Resolution

2.4 记录角度误差对光栅光谱性能的影响

同记录臂长误差对光栅光谱性能方法相同，根据平面变栅距光栅刻线密度与像差关系及光谱仪器的结构，依次考察记录角度误差对光栅刻线密度、聚焦曲线、谱像宽度及分辨能力的影响。

2.4.1 记录角度误差对光栅刻线密度的影响

在记录角度不变的情况下，只改变记录角度，根据式(1)的刻线密度表达式计算在不同记录角度误差下光栅表面各点刻线密度实际值与设计值的绝对误差曲线，如图 7 所示。图 7 中 4 条曲线，分别为记录角度 γ 和 δ 误差分别为±0.01 rad 时，刻线密度绝对误差分布曲线(图中表示为 γ±0.01 等，下同)。由图可知，记录角度误差：(1)对光栅表面各点刻线密度都有影响，刻线密度绝对误差曲线基本上呈一直线；(2)对刻线密度函数分布影响较大，引起的刻线绝对误差约为 10～20 gr·mm^{-1}；(3)分别为±0.01 rad 时，刻线误差曲线基本上以光栅子午线为轴对称分布。

2.4.2 记录角度误差对聚焦曲线的影响

在记录角度不变的情况下，只改变记录角度，根据聚焦方程 $F_{20}=0$，计算在不同记录角度误差下聚焦曲线以及其绝对误差曲线，如图 8 所示。图 8(a)中的 5 条曲线，分别为理想记录参数下及记录角度 γ 和 δ 分别为±0.01 rad 时的聚焦曲线，图 8(b)中的 4 条曲线，分别为使用波段下记录角度 γ 和 δ 误差分别为±0.01 rad 时与理想聚焦点绝对误差曲线。由图 8(a)可知，记录角度误差引起的聚焦点变化较大。由图 8(b)可知，记录角度误差：(1)引起的聚焦点绝对误差值约为 37～40 mm，远大于光谱仪器聚焦点 0.01 rad 误差容限；(2)分别为±0.01 rad 时，聚焦曲线以子午线为轴对称分布且近似为一直线。

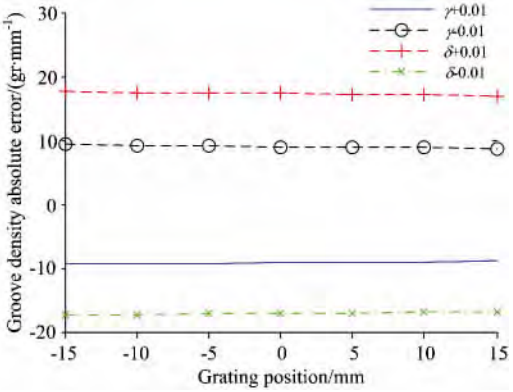


Fig. 7 Effects of recording angle error on groove density absolute error curve

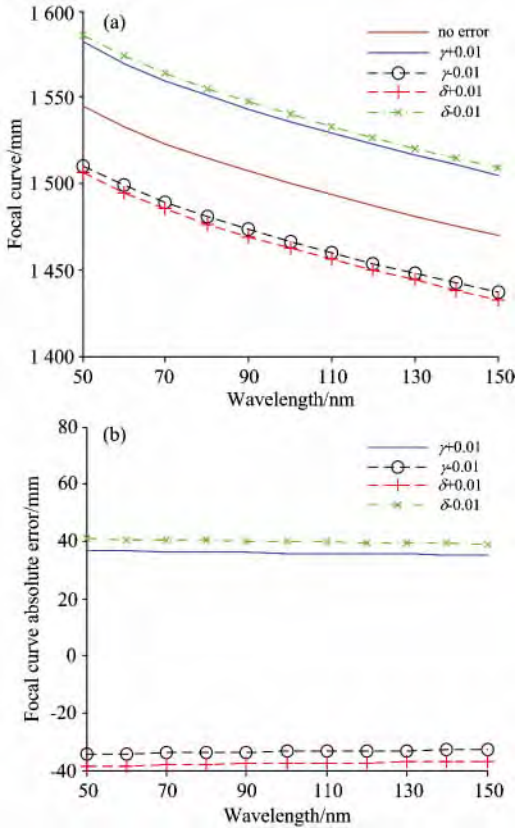


Fig. 8 Effects of recording angle error on focal curve

(a): Focal curve; (b): Focal curve absolute error curve

2.4.3　记录角度误差对谱像宽度及分辨能力的影响

在其他参数不变的情况下，只改变记录角度，计算不同波长下的谱像宽度以及分辨能力。分别通过光线追迹计算谱像的中心宽度及像差对变栅距光栅光谱分辨能力的影响计算其理论分辨能力，如图 9 所示。图 9(a)中的 5 条曲线，分别为理想记录参数及记录角度 γ 和 δ 误差分别为 ±1 mm 时的谱像宽度，图 9(b)中的 5 条曲线，分别为理想记录参数下的分辨能力及记录角度 γ 和 δ 误差分别为 ±0.01 rad 时的分辨能力曲线。从图可知，记录角度误差：(1)引起的谱像宽度变化约为 0.19～0.21 mm；(2)使得分辨能力降低至 2 000，远小于仪器分辨能力 12 000 的使用要求；(3)分别为 ±0.01 rad 时，谱像宽度和分辨能力曲线基本重合。

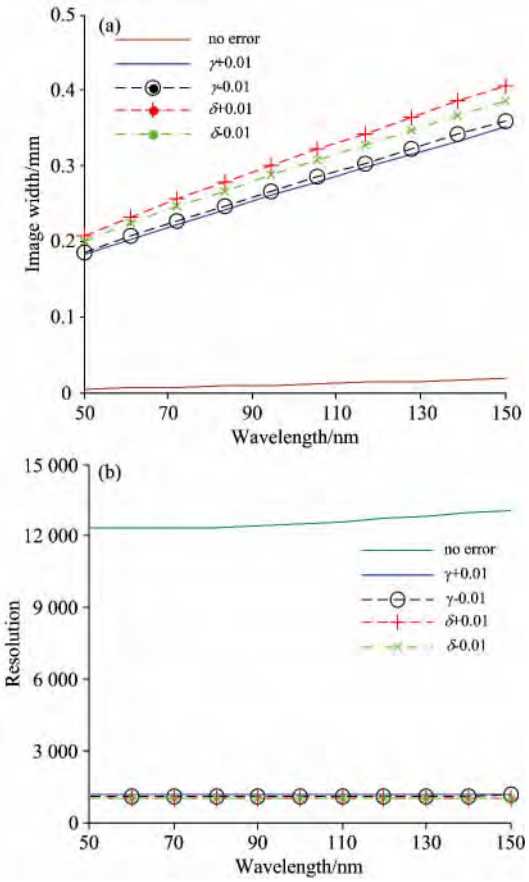


Fig. 9　Effects of recording distance errors on image

(a)：Image width；(a)：Resolution

3　记录参数补偿

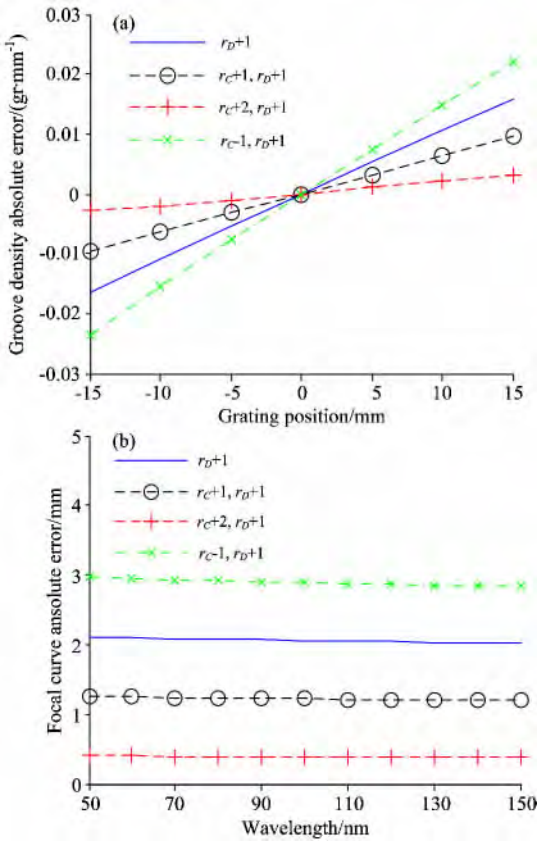
由以上对记录参数的误差分析可知，当记录臂长误差为 ±1 mm 时或记录角度误差为 ±0.01 rad 时，都无法满足在线诊断光谱仪 12 000 的分辨能力使用要求，所以需要对记录参数误差进行补偿。

3.1　记录臂长误差补偿

由图 4—图 6 可知，记录臂长误差：(1)分别为 ±1 mm 时引起的刻线密度绝对误差曲线和聚焦曲线呈对称分布，谱像宽度和分辨能力曲线重合，所以在记录臂长误差补偿时仅考虑误差为 1 mm 情况；(2)引起的刻线密度和聚焦曲线的变化趋势相同的，因此在记录角度 r_C(或 r_D)存在误差时，调节 r_D(或 r_C)进行补偿，补偿后光栅刻线密度、聚焦曲线、谱像宽度及分辨能力如图 10 所示。图 10(a)和(b)中的 4 条曲线，分别为记录臂长(r_C，r_D+1)，(r_C+1，r_D+1)，(r_C+2，r_D+1)和(r_C-1，r_D+1)时的刻线密度绝对误差和聚焦点绝对误差曲线，图 10(c)和(d)中的 5 条曲线，分别为理想记录参数和记录臂长(r_C，r_D+1)，(r_C+1，r_D+1)，(r_C+2，r_D+1)和(r_C-1，r_D+1)时的谱像宽度和分辨能力曲线。由图 10 可知，(1)当仅 r_D 有误差时，聚焦点绝对误差约为 2 mm，分辨能力约为 19 000～12 700，未达到仪器使用要求；(2)记录臂长 r_C 和 r_D 的相对误差越小，刻线密度误差、聚焦曲线、谱像宽度即分辨能力变化越小，当(r_C+2，r_D+1)时，刻线密度绝对误差约为 −0.002～0.002 gr·mm^{-1}，聚焦点绝对误差约为 0.38～0.4 mm，谱像宽度约为 0.025 mm，分辨能力 12 350～12 750，满足在线诊断光谱仪使用要求。在光栅制作过程中，可以通过减小记录臂长的相对误差来降低单侧记录臂长误差引起的刻线密度绝对误差、聚焦点误差、谱像宽度及分辨能力的影响。

3.2　记录角度误差补偿

由图 7—图 9 可知，记录角度误差：(1)分别为 ±0.01 rad 时引起的刻线密度绝对误差曲线和聚焦曲线呈对称分布，谱像宽度和分辨能力曲线重合，所以在记录角度误差补偿时仅考虑误差为 0.01 rad 情况；(2)引起的刻线密度和聚焦曲线的变化趋势相同的，因此在记录角度 γ(或 δ)存在误差时，调节 γ(或 δ)进行补偿，补偿后光栅刻线密度、聚焦曲



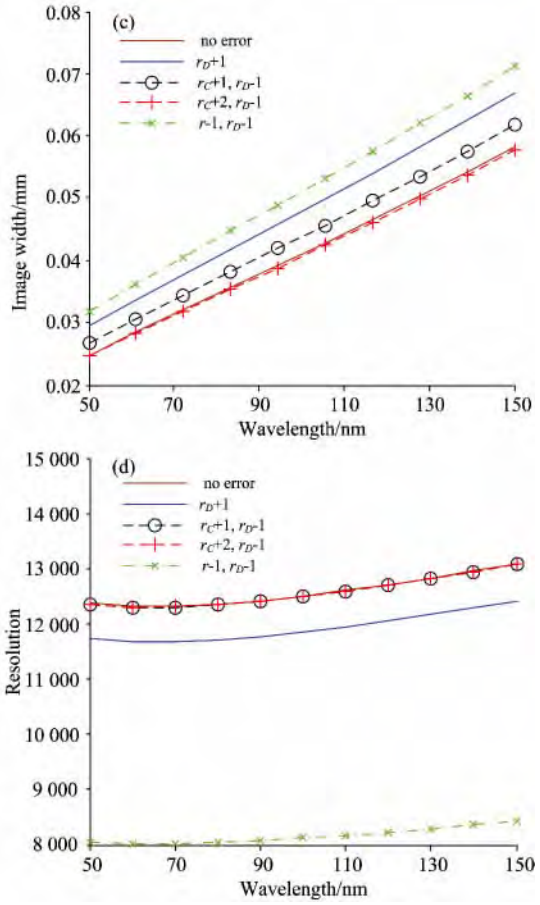


Fig. 10 Compensation for recording distance error

(a): Absolute error curve of groove density; (b): Absolute error curve of focal; (c): Image width curve; (d): Resolution curve

线、谱像宽度及分辨能力如图 11 所示。图 11(a)和(b)中的 3 条曲线，分别为记录角度(γ，δ+0.01)、(γ+0.01，δ+0.01)和(γ−0.01，δ+0.01)时的刻线密度绝对误差和聚焦点绝对误差曲线，图 11(c)和(d)中的 4 条曲线，分别为理想记录参数和记录角度(γ，δ+0.01)、(γ+0.01，δ+0.01)和(γ−0.01，δ+0.01)时的谱像宽度和分辨能力曲线。由图 11 可知，(1)当仅有 δ 有误差时，聚焦点绝对误差约为 40 mm，分辨能力约为 2 000，未达到仪器使用要求；(2)记录角度 γ 和 δ 的相对误差越小，刻线密度误差、聚焦曲线、谱像宽度及分辨能力变化越小，当(γ+0.01，δ+0.01)时，刻线密度绝对误差约为 7 gr·mm^{-1}，聚焦点绝对误差约为 0.7 mm，谱像宽度约为 0.025 mm，分辨能力 12 350～12 750，满足在线诊断光谱仪使用要求。在光栅制作过程中，可以通过减小记录角度的相对误差来降低单侧记录角度误差引起的刻线密度绝对误差、聚焦点误差、谱像宽度及分辨能力的影响。

4 结 论

为制作应用于在线监测光谱仪的高光谱分辨率的变栅距全息光栅，利用数值计算的方法讨论了记录参数误差对光栅成像质量的影响。计算并分析了记录臂长误差和角度误差下

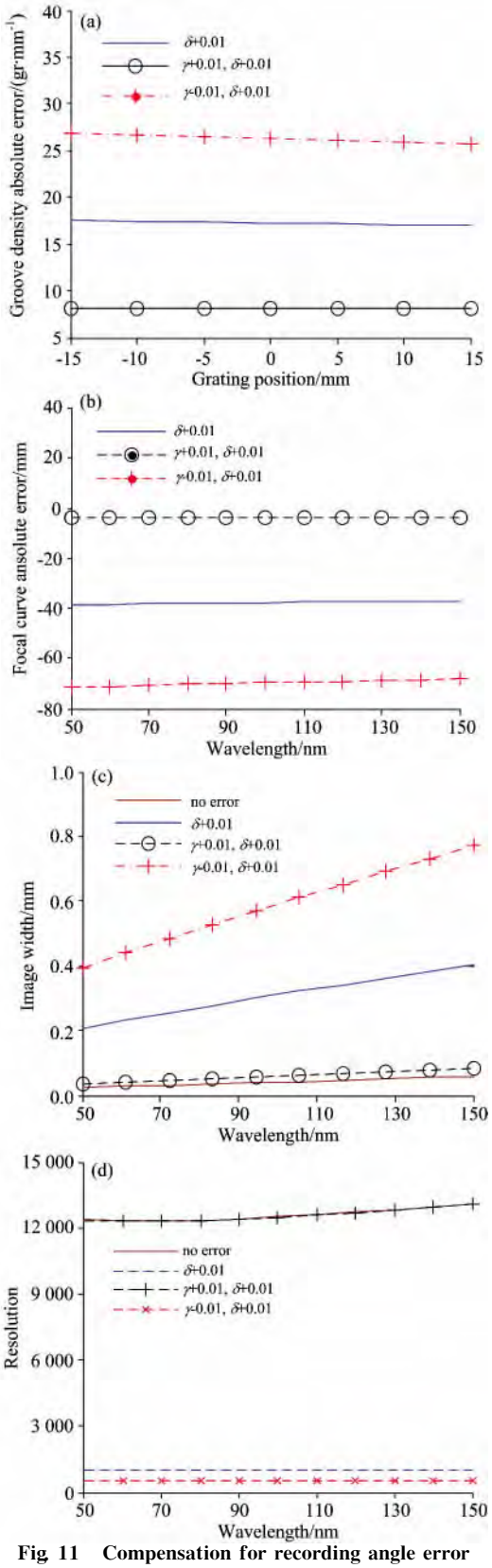


Fig. 11 Compensation for recording angle error

(a): Absolute error curve of groove density; (b): Absolute error curve of focal; (c): Image width curve; (d): Resolution curve

光栅刻线密度、聚焦曲线、谱像宽度及分辨能力变化并得出

以下结论：在光栅使用参数固定的情况下：(1)记录参数误差影响平面变栅距全息光栅刻线密度分布，引起像差变化，降低光栅分辨能力；(2)记录臂长误差对光栅中心刻线密度无影响，刻线密度绝对误差曲线以光栅中心为轴左右呈对称分布，因此对谱像宽度影响较小，记录角度误差引起的刻线密度绝对误差曲线近似为一直线，说明光栅表面刻线密度变化主要为轴向平移，造成光谱成像位置较大的偏移，对谱像宽度影响较大；(3)记录角度误差是降低平面变栅距全息光栅分辨能力的主要因素，因此在光栅设计时可以通过对记录角度加权的方法来提高记录角度的取值的精确度；(4)记录参数的相对误差决定了其对光栅刻线密度、聚焦曲线、谱像宽度及分辨能力的影响程度；(5)记录臂长误差及记录角度误差对平面变栅距全息光栅成像的影响可分别通过调节记录臂长和记录角度的相对误差进行补偿。通过本文的分析确定了对应用于在线监测光谱仪光栅成像质量影响较大的误差因素，并给出记录误差的相应补偿方法，满足在线诊断光谱仪 12 000 分辨能力的要求，降低曝光系统的调试难度，为制作平面变栅距全息光栅提供理论指导。

References

[1] Kim K. American Institute of Physics, 1989,184: 565.

[2] Duke P H. Synchrotron Radiation. Oxford: Oxford University Press, 2000.

[3] MA Dun-li(马礼敦). Introduction to Synchrotron Radiation Applications(同步辐射应用概论). Shanghai: Fudan University Press(上海：复旦大学出版社), 2001.

[4] Hofmann A. The Physics of Synchrotron Radiation. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

[5] LIU Zu-ping(刘祖平). Physics Introduction to Synchrotron Radiation (同步辐射光源物理引论). Hefei: University of Science and Technology of China Press(合肥：中国科学技术大学出版社),2009.

[6] LI Chaoyang, ZHU Junfa, WANG Qiuping. Journal of Physics:Conference Series,2013, 425:162008.

[7] DU Xue-wei, SHEN Yong-cai, LI Chao-yang(杜学维，沈永才，李朝阳). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2012, 32(8): 2270.

[8] Françis Polack, Lagarde B, Idir M. American Institute of Physics. Synchrotron Radiation Instrumentation: Ninth International Conference, 2007. 20.

[9] Noda H, Namioka T, Seya M. J. Opt. Soc. Am., 1974, 64(8): 1037.

[10] Robert Grange. Applied Optics,1992, 31(19): 3744.

[11] Masato Koike,Takeshi Namioka. Applied Optics,1997, 36(25): 6308.

[12] LOU Jun, FU Shao-jun, XU Xiang-dong, et al(楼 俊，付绍军，徐向东，等). Acta Physica Sinica(物理学报), 2006, 55(12): 6406.

[13] Namioka T, Seya M, Noda H. Japan Journal of Applied Physics, 1976, 15: 1181.

[14] Itou M, Harada T, Kita T. Applied Optics, 1989, 28(1): 146.

[15] Lou J, Liu Y, et al. Proc. SPIE, Holography,Diffractive Optics, and Applications II, 2005, 5636: 551.

[16] Hettrick M C,Underwood J H, et al. Applied Optics, 1988, 27(2): 200.

Study on the Effects and Compensation Effect of Recording Parameters Error on Imaging Performance of Holographic Grating in On-Line Spectral Diagnose

JIANG Yan-xiu[1,2], Bayanheshig[1*], YANG Shuo[1,2], ZHAO Xu-long[1,2], WU Na[1], LI Wen-hao[1]

1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract To making the high resolution grating, a numerical calculation was used to analyze the effect of recording parameters on groove density, focal curve and imaging performance of the grating and their compensation. Based on Fermat's principle, light path function and aberration, the effect on imaging performance of the grating was analyzed. In the case of fixed using parameters, the error of the recording angle has a greater influence on imaging performance, therefore the gain of the weight of recording angle can improve the accuracy of the recording angle values in the optimization; recording distance has little influence on imaging performance; the relative errors of recording parameters cause the change of imaging performance of the grating; the results indicate that recording parameter errors can be compensated by adjusting its corresponding parameter. The study can give theoretical guidance to the fabrication for high resolution varied-line-space plane holographic grating in on-line spectral diagnostic and reduce the alignment difficulty by analyze the main error effect the imaging performance and propose the compensation method.

Keywords Varied-line-space plane holographic grating; Resolution; Focal curve; Groove density error; Spectral width

* Corresponding author

(Received Sep. 18, 2014; accepted Jan. 28, 2015)